Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

L'esprit de recherche au cœur des réseaux

Transports Québec

Direction du Laboratoire des Chaussées

UTILITAIRE DE POST TRAITEMENT POUR VISCOROUTE
MANUEL D'UTILISATION

Opération de recherche 11P063

« Outils avancés de calcul et de dimensionnement des structures de chaussées »

Par :

Denis ST-LAURENT, ing.

Division Structures et Matériaux pour
les Infrastructures de Transport (SMIT)

Le 4 août 2008

LCPC **Etablissement Public national à caractère Scientifique et Technologique**
Paris 58 boulevard Lefebvre - 75732 Paris cedex 15
Nantes Route de Bouaye - BP 4129 - 44341 Bouguenais cedex
Marne-la-Vallée LMSGC - Cité Descartes, Parc Club de la Haute Maison
2 allée Kepler - 77420 Champs-sur-Marne
Satory LIVIC - Batiment 140 - 13 route de la Minière - Satory - 78000 Versailles
Internet www.lcpc.fr

TABLE DES MATIÈRES

1.0 Introduction 1
1.1 Contexte d'application 1
2.0 Installer l'application 2
3.0 Lancer l'application 3
4.0 Utiliser l'application 4
4.1 Directives générales 5
4.2 Figure multichamps 6
4.3 Figures dans le plan P-Q 8
5.0 Mises en garde 9
6.0 Bibliographie 10

1.0 Introduction

Le logiciel VISCOROUTE (Duhamel et al., 2005) permet de calculer de manière semi-analytique les champs de sollicitation dans une chaussée composée de matériaux viscoélastiques (modèle de Huet-Sayegh, 1963) et soumise au passage d'une charge roulante. Les champs de sollicitation comprennent les contraintes, déformations et déplacements, ainsi que la cinétique des déplacements en terme de vitesse et d'accélération.

On assume l'hypothèse d'un régime permanent, ce qui permet d'éviter l'introduction d'un pas de temps en transposant le problème dans le repère de la charge roulante ($x = X - V \cdot t$). L'algorithme de calcul s'appuie sur une formulation résolue dans l'espace fréquentiel de Fourier à partir des résultats de la thèse de Nguyen (2002) et du développement mathématique de Chabot (2000).

1.1 Contexte d'application

La solution finale dans VISCOROUTE s'obtient par une double transformée inverse de Fourier, ce qui implique l'établissement d'un maillage bidimensionel, dans un plan horizontal situé à la profondeur de calcul donnée. L'étendue et la finesse de ce maillage sont définies indépendamment de l'utilisateur, par le biais de critères de tolérance numérique basés sur le taux de convergence de l'intégrale de la solution obtenue a priori dans le domaine des nombres d'ondes. Ce maillage peut varier selon la profondeur de calcul ou selon le champs choisi, et les fichiers de résultats comportent en général trop de colonnes pour être lus dans un chiffrier classique comme Excel. La lecture des résultats nécessite donc le recours à des logiciels bien adaptés.

L'interface de VISCOROUTE permet de tracer des résultats sous forme de courbes. En pratique, l'exploitation tends à requérir des travaux de programmation additionnels, par exemple lorsqu'il s'agit de :

- Déterminer le minimum ou maximum en un pic situé entre deux points du maillage.
- Tracer un champ le long d'une coupe ne coïncidant pas avec le maillage.
- Calculer les invariants du tenseur de contraintes.
- Tracer plusieurs variantes de calcul sur un même graphe en vue de les comparer.
- Tracer un champ le long d'une coupe verticale.

Ces besoins en manipulations en été rencontrés dans le cadre de requêtes où l'on devait tracer des chemins de contraintes dans le plan des invariants p-q, et comparer des solutions élastiques et viscoélastique ainsi que des résultats obtenus en situation de roulement et de freinage ou accélération (projet DEVIN).

Un petit utilitaire de post-traitement a été programmé en langage PYTHON pour répondre aux besoins pratiques énumérés ci haut. Il faut noter que cet utilitaire ne fait pas l'entrée des données correspondant au pré traitement. L'outil se limite au stade d'utilitaire de recherche et ne prétends pas être adapté à des calculs de dimensionnement des chaussées puisqu'il n'inclue aucun calcul de durée de vie ou d'endommagement. Le tracé d'une coupe verticale n'a pas été développé.

2.0 Installer l'application

Le bon fonctionnement de cet utilitaire requiert l'installation préalable de PYTHON[1] 2.4 ou 2.5 avec les librairies scientifiques additionnelles SCIPY[2], NUMPY[3] et MATPLOTLIB[4]. Il s'agit d'un langage et de librairies de programmation à code source ouvert, libre et gratuit. Ce matériel est soumis à une licence de type BSD, ce qui nous permet d'en faire à peu près ce que nous voulons.

Cette liberté extrême explique aussi l'existence de versions commerciales. À ce propos, l'installation du paquet « ENTHOUGHT PYTHON » représente une alternative comprenant tout le nécessaire dans un unique fichier d'installation. Bien que commerciale, cette distribution est compatible et prévoit une version académique gratuite que nous avons déposée en version WINDOWS dans R:\ commun\ Informatique\ Logiciels\ Python\ epd-2.5.2001-windows_x86.msi[5].

Il faut noter que PYTHON est à la base indépendant du système d'exploitation utilisé (WINDOWS, GNU/LINUX, …). Les programmes écrits pour cet environnement portent l'extension « .py » et peuvent s'ouvrir directement avec n'importe quel éditeur de texte.

Notre script a été déposé dans le répertoire R:\ commun\ Informatique\ Logiciels\ Viscoroute\ PostTraiteVISCOROUTE. Le fichier « info.txt » fournit quelques indications d'installation, tandis que l'application réside dans le fichier « vrpGUI.py » qui constitue le programme principal à exécuter en double-cliquant dessus. Cette application a recours au fichier « vrp.py » situé dans le même répertoire.

[1] http://python.org/
[2] http://www.scipy.org/
[3] http://numpy.scipy.org/
[4] http://matplotlib.sourceforge.net/
[5] Pour la dernière version voir chez http://code.enthought.com/
Cliquer sur Enthought Python Distribution -> download -> Academic (version gratuite)

3.0 Lancer l'application

Une fois que tout est installé, il suffit de double cliquer sur le fichier « vrpGUI.py » ou d'entrer la commande suivante dans un terminal : python <chemin du répertoire>vrpGUI.py

Ceci devrait faire apparaître la fenêtre suivante :

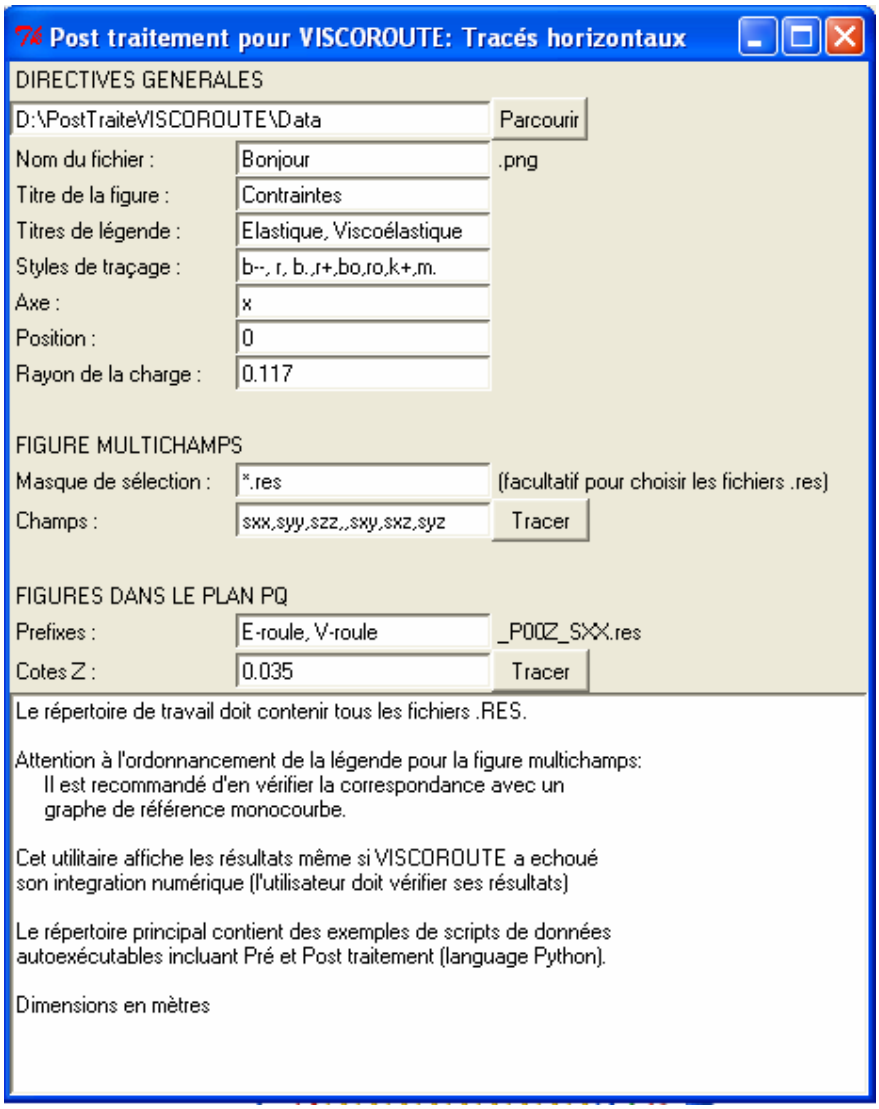

Figure 1 : Fenêtre de dialogue de l'application

4.0 Utiliser l'application

Une valeur par défaut est inscrite dans chacun des champs de saisie, dans l'intention « d'aider » l'utilisateur. Un jeu de résultats permet d'exécuter directement ce cas de démonstration pour vérifier le fonctionnement de l'outil (Figure 2 et Figure 3). On peut aisément éliminer ou changer les valeurs par défaut dans le code source en fonction de ses préférences. Certaines instructions sont inscrites dans la boîte de texte en bas de l'application, et plus d'informations sont données dans ce qui suit.

Il s'agit d'un utilitaire de « post-traitement » uniquement. Cela sous-entends que tous les fichiers résultats (.res) de VISCOROUTE, requis pour le post-traitement, ont été calculés et sauvegardés au préalable. L'application permet alors de tracer une figure « multichamps » ou une figure « dans le plan pq ».

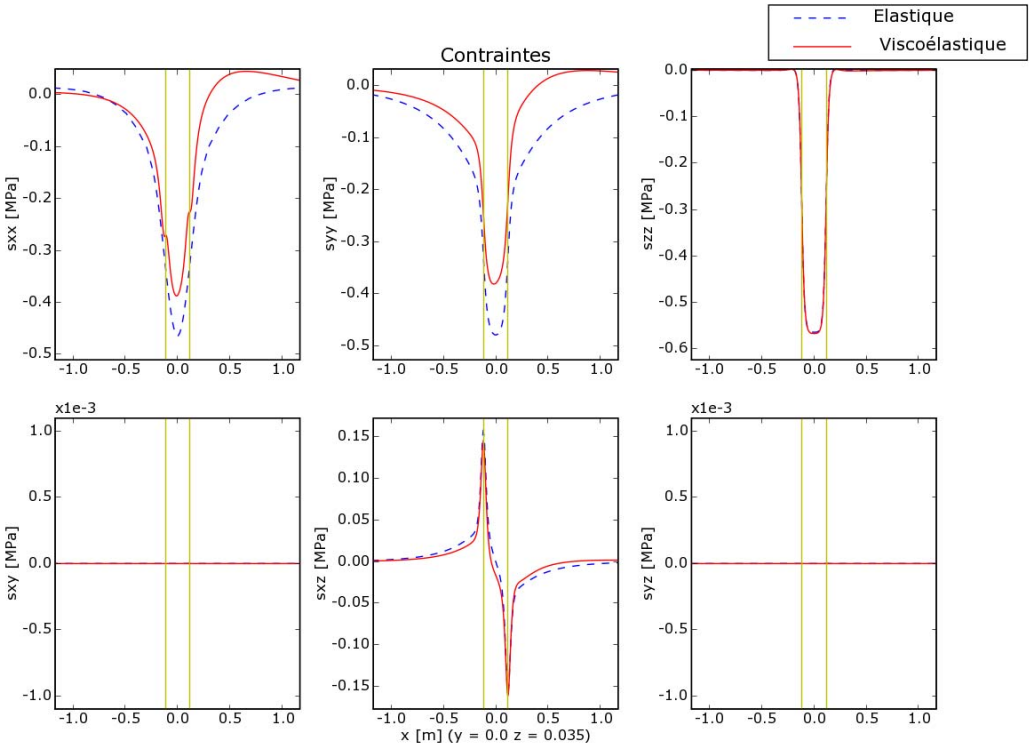

Figure 2 : Démonstration de la figure multichamps

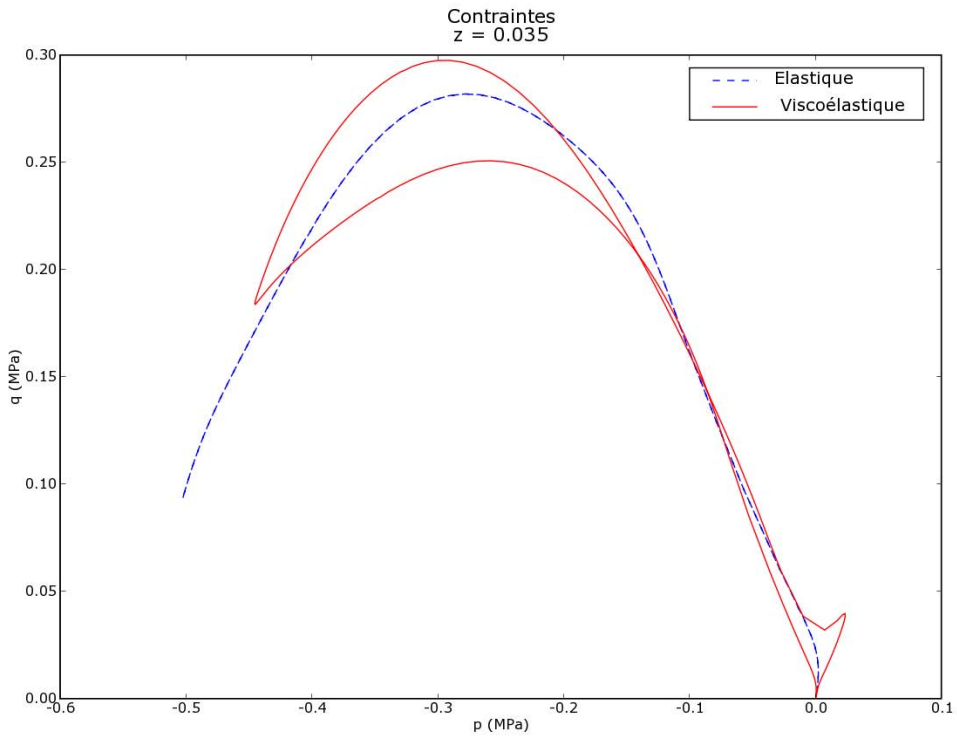

Figure 3 : Démonstration du diagramme PQ

4.1 Directives générales

Les instructions qui suivent se réfèrent dans l'ordre aux cases et boutons de l'écran illustré à la Figure 1. Dans tous les cas de post-traitement, on doit définir au préalable les directives générales, c'est-à-dire :

- Le répertoire où se trouvent les fichiers résultats de VISCOROUTE. Les figures réalisées par le post-traitement seront sauvegardées dans ce même répertoire. Il est recommandé de sélectionner ce répertoire avec le bouton « Parcourir ».
- Le nom du fichier de sauvegarde de la figure qui sera tracée. Il s'agit d'un fichier photo de type « .png », reconnu par la plupart des logiciels de mise en page ou de graphisme.
  Un fichier texte (extension « .txt ») est aussi créé pour chaque courbe en vue de faciliter l'importation de données dans un chiffrier de style Excel.

  Il faut noter que la figure apparaît aussi à l'écran en mode interactif. Cette fenêtre permet alors d'ajuster le cadrage et de sauvegarder à nouveau (Figure 4).
- Le titre de la figure
- Les titres de la légende, séparés par des virgules.
- Les styles de traçage (lignes ou marques), séparés par des virgules. Utilisés de concert avec la légende, les styles[6] impliquent typiquement un caractère pour la couleur et un autre pour le type de traçage :

[6] Voir http://matplotlib.sourceforge.net/matplotlib.pyplot.html#-plot pour une description complète des styles admissibles.

- Codes de couleurs : b=bleu, g=vert, r=rouge, c=cyan, m=magenta, y=jaune, k=noir, w=blanc.
- Codes de traçage: -=trait plein, --=trait discontinu, :=pointillé, -.=trait alterné, .=points, ,=pixels, o=cercles, ^=triangles, v=triangles inversés, <=triangles couchés à gauche, >=triangles couchés à droite, s=carrés, +=plus, x=croix, D=losanges, d=losanges étroits, 1 à 4=tripodes, h=hexagone, H=hexagone pivoté, p=pentagone, |=barres verticales, _=barres horizontales.

- L'axe le long duquel on tracera la courbe (longitudinal « x » ou transversal « y »)
- La position de la coupe suivant l'autre axe, en mètres. Cette valeur n'est pas forcée de coïncider avec les points du maillage puisque l'algorithme de Nyquist-Shannon (Senti et Chabot, 2007) est appliqué au besoin dans l'axe x et y.
- Le rayon de la charge, en mètres. Ce paramètre sert à tracer deux droites verticales illustrant dans les graphes de la figure multichamps le positionnement des bords de la charge appliquée. Le programme utilise aussi l'algorithme d'interpolation de Shannon pour affiner le traçage des courbes au voisinage de la charge.

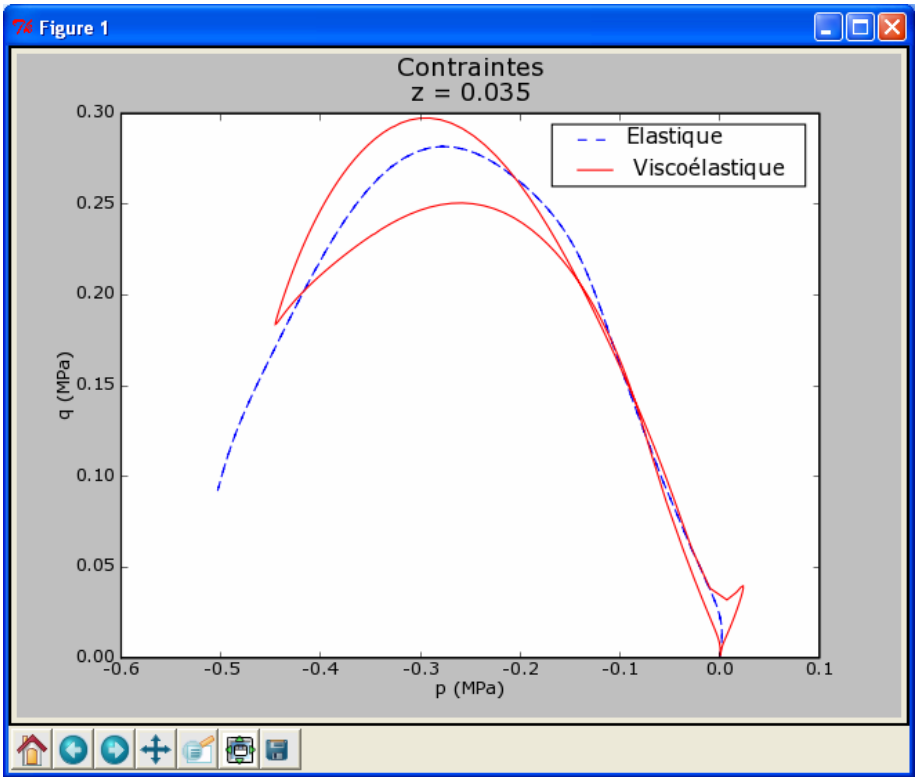

Figure 4 : Fenêtre interactive avec barre d'outils pour le recadrage

4.2 Figure multichamps

Cette fonction permet de tracer une courbe horizontale illustrant les valeurs d'un champ quelconque le long de l'axe x ou y (Figure 2). Son intérêt principal réside dans la possibilité de superposer plusieurs courbes, issues de diverses variantes de calcul, sur un même graphe. Elle permet en outre si l'on veut de disposer plusieurs champs sur différents graphes dans une même figure. Il s'agit simplement d'énumérer les champs à tracer, séparés par une ou deux virgules. Les types de champs sont reconnus avec les chaînes de caractères suivantes :

Contraintes : sxx, syy, szz, syz, sxz, sxy
Déformations : exx, eyy, ezz, eyz, exz, exy
Déplacements : ux, uy, uz
Vitesses : vx, vy, vz,
Accélérations : ax, ay, az

Les graphes se suivent en colonnes sur la même ligne lorsque les champs sont séparés par une virgule. Deux virgules consécutives sont nécessaires pour indiquer un saut sur la ligne suivante. Le bouton « Tracer » lance l'exécution de ce post-traitement.

Les noms des fichiers de résultat doivent se terminer par l'étiquette de champ calculé afin de permettre au programme d'établir la correspondance, par exemple : V-roule_P035**_SXX**.res pour la contrainte normale suivant l'axe x. C'est ce qui permet de bien trier les champs.

Tous les fichiers résultats « .res » requis pour ces graphiques doivent évidemment être disponibles dans le répertoire de travail. Ces fichiers doivent aussi être sélectionnés en tant que fichiers à inclure dans le post-traitement. Les courbes correspondantes à un fichier absent ou non sélectionné ne peuvent pas être tracées. Une fenêtre (Figure 5) demandera de choisir les fichiers manuellement si la case du masque de sélection est vide. On peut choisir plusieurs fichiers en maintenant la touche CTRL enfoncée.

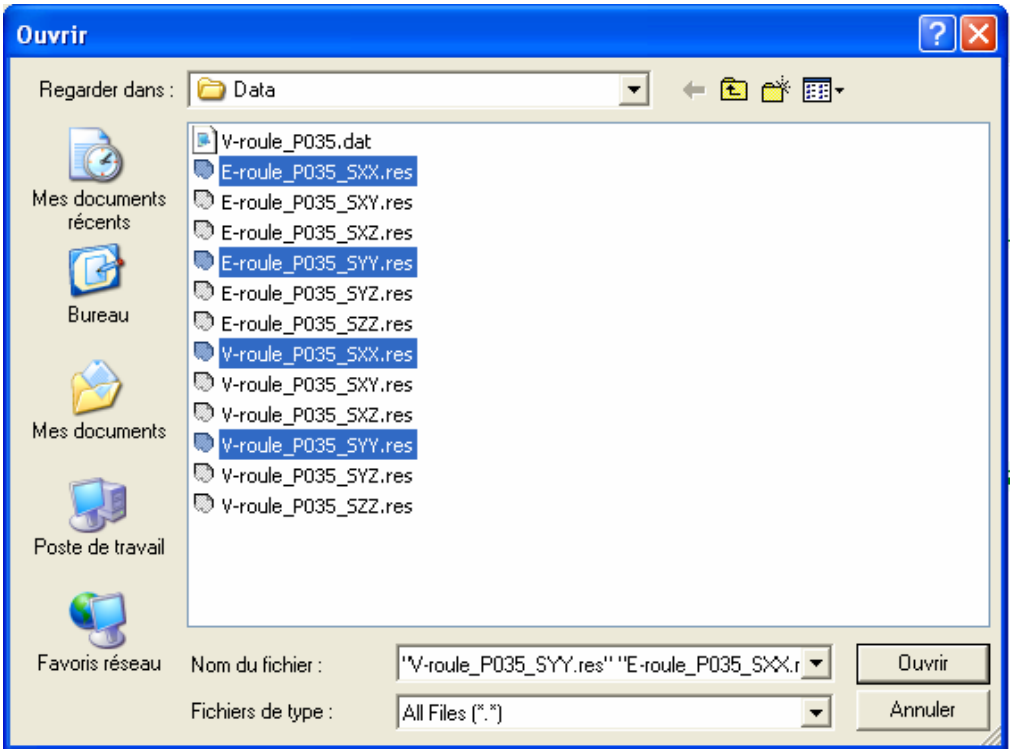

Figure 5 : Sélection manuelle des résultats à inclure dans un graphe multichamps (Requis uniquement lorsque le masque de sélection est vide)

Le masque de sélection permet d'éviter cette fenêtre de sélection manuelle. Pour l'exemple illustré sur la Figure 1, le masque « *.res » va retenir toutes les variantes de calcul et filtrer les champs qu'il a besoin. On pourrait entrer « V*.res » si on ne voulait tracer que la variante

viscoélastique, sachant qu'on a adopté par convention de commencer les noms des fichiers de calcul viscoélastique par la lettre « V » lors du pré traitement. Il faudrait dans ce cas penser à modifier la légende en conséquence. Le masque peut inclure autant de caractères « * » que nécessaire, ce qui permet d'accommoder des conventions de nommage relativement complexes (par exemple, on utiliserait V*_P035_*.res si le répertoire de travail comprenait des fichiers résultats sur plusieurs profondeurs d'observation).

Mise en garde pour la légende de la figure multichamps
Lors du tracé simultané de plusieurs courbes d'un même type de champ, la méthode de tri utilisée ne permet pas d'assurer la correspondance entre la légende affichée et la signification réelle des différentes courbes. Les fichiers choisis avec le masque de sélection sont en principe triés de façon alphabétique et il vaut mieux ordonner la légende de la même façon. Il est de plus recommandé de vérifier l'ordonnancement en se référant à quelques graphes témoins tracés avec une courbe unique.

4.3 Figures dans le plan P-Q

Cette fonction permet de tracer un diagramme des états de contraintes le long de l'axe de roulement, représenté avec les deux invariants de contraintes p et q (Figure 3) :

$$p = \frac{1}{3} tr(\underline{\underline{\sigma}}) = \frac{\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right)}{3}$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} tr(s^2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}\right)^2 + \left(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}\right)^2 + \left(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}\right)^2 + 6\left(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2\right)^2}$$

Ces figures visent l'étude du risque d'orniérage de la structure. Tous les fichiers résultats « .res » requis pour ces graphiques doivent évidemment être disponibles dans le répertoire de travail. On doit donc retrouver les six champs de contraintes avec les noms de fichiers se terminant par _SXX.res, _SYY.res, _SZZ.res, _SXY.res, _SXZ.res et _SYZ.res. La fonction se charge de regrouper les fichiers comportant le même nom de début de fichier pour chaque courbe à calculer. L'interpolation est faite avec l'algorithme de Nyquist-Shanon pour uniformiser les maillages avant de calculer les invariants p et q. La case des préfixes doit contenir l'énumération des débuts de noms de fichiers correspondant aux titres de la légende. Une figure sera tracée pour chaque cote Z indiquée.

5.0 Mises en garde

Le présent outil est un utilitaire dédié à la recherche, conçu en supposant que l'utilisateur comprends et vérifie l'exploitation qu'il en fait. Il est recommandé de vérifier les tracés avant de les utiliser.

Il faut par exemple noter que VISCOROUTE ne parvient pas toujours à résoudre correctement la double transformée de Fourier (en particulier pour le champ ezz, ou pour les calculs près de la surface). Il débute avec un maillage grossier (128 x 128 éléments) et double le nombre d'éléments jusqu'à la satisfaction des critères de tolérance. Ceci peut conduire à des fichiers de résultats de plusieurs dizaines de mégaoctets et à des temps de calcul importants. À un certain moment, le processus de raffinement peut être interrompu et le fichier de résultat est sauvegardé mais le programme affiche un message indiquant que la « précision du calcul n'est pas garantie » (Figure 6). L'utilisateur doit donc penser à vérifier la validité de ses fichiers de résultats car le présent utilitaire les utilise sans distinction.

Il faut aussi se méfier de la correspondance entre les étiquettes de la légende et les noms des fichiers « .res » lorsqu'on trace plusieurs courbes sur un même graphe multichamps. L'utilitaire ne peut pas connaître la vraie correspondance et assigne les noms par ordre alphabétique.

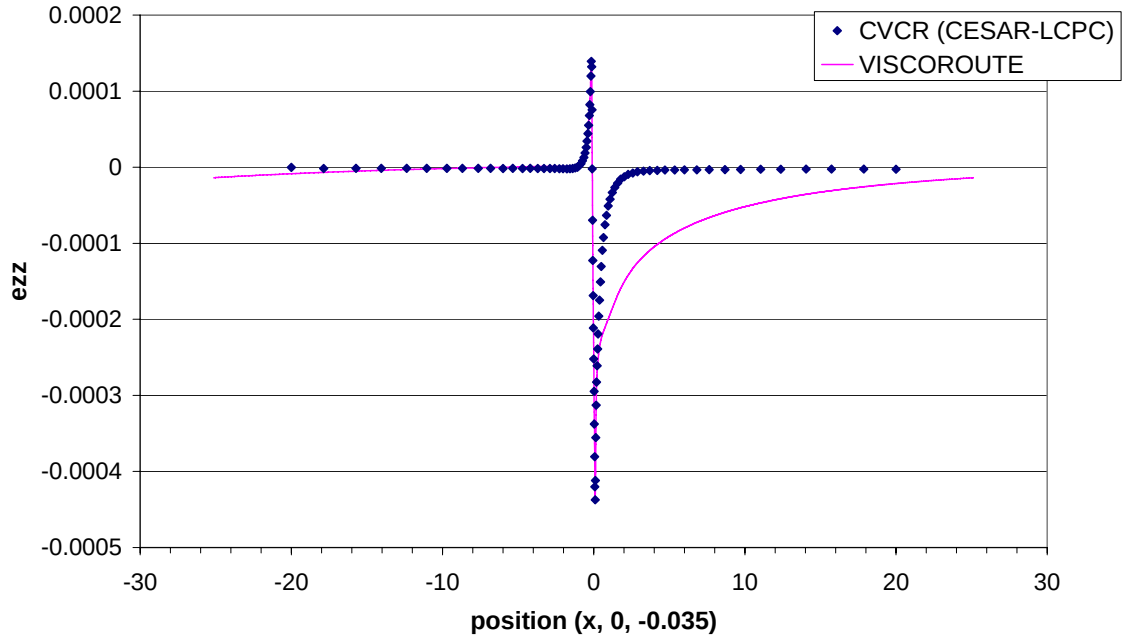

Figure 6 : Exemple d'un calcul VISCOROUTE avec le message « Attention la précision du calcul n'est pas garantie »

6.0 Bibliographie

- Chabot A., Piau J. M. (2001) « Calcul semi-analytique d'un massif viscoélastique soumis à une charge roulante rectangulaire. », poster, 1ère Conférence Internationale Albert Caquot, 3-5 Octobre, Paris.
- Chabot A., Tamagny P., Duhamel D., Poché D., (2006) « Visco-elastic modeling for asphalt pavements – software ViscoRoute » 10th International Conference on Asphalt Pavements, 12-17 August, Québec, Canada.
- Duhamel D., Chabot A., Tamagny P., Harfouche L., (2005) « Viscoroute: Visco-elastic modeling for asphalt pavements - Viscoroute : Modélisation des chaussées bitumineuses. » Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées, (258-259), 89-103.
- Duhamel, D., V. H. Nguyen, A.Chabot, P.Tamagny (2003b) « Modelling of multilayer viscoelastic road structures under moving loads » 9th International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Amsterdam, Netherlands, 2-4 Septembre 2003.
- Duhamel, D., V. H. Nguyen, A.Chabot, P.Tamagny, (2003a) « Modélisation de chaussées viscoélastiques », 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, France, 1-3 Septembre 2003.
- Huet, C. (1963) « Etude par une méthode d'indépendance du comportement viscoélastique des matériaux Hydrocarbonés » Thèse de docteur-ingénieur, Faculté de Sciences de Paris.
- LCPC (2007) « Guide d'utilisation ViscoRoute-v1 »
- Lohf, A. (2005), « Evaluation de ViscoRoute V1 pour l'étude de quelques chaussées souples », Rapport de stage de 5ème année de l'université de Dresde, option « Chaussées et aménagement des villes », LCPC, Sept.-Déc. 2005.
- Nguyen V.H. (2002) « Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles » thèse de doctorat, ENPC, France.
- Poché D. (2005) « Validation et premières applications de Viscoroute à l'étude des chaussées souples ». Stage de MASTER PRO (2ème année) analyse numérique de l'Université de Nantes, février-juin 2005
- Sayegh G. (1963) « Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux » Conférence au Groupe Français de Rhéologie, 51-74.
- Senti A., Chabot A., 2007. Post-traitement Shannon des courbes Viscoroute-v1 (diffusable), programmation SCILAB.
- Senti, A. (2007) « Application et développement du logiciel ViscoRoute-v2 pour l'étude des multicharges sur chaussées bitumineuses » Rapport de stage de Master 2 Génie mécanique, LCPC, Université d'Evry.